

高感度広ダイナミックレンジ撮像素子に関する研究

著者	赤羽 奈々
号	53
学位授与番号	4171
URL	http://hdl.handle.net/10097/42585

あか はね な な

氏 名 赤 羽 奈 々

授 与 学 位 博士 (工学)

学 位 授 与 年 月 日 平成 21 年 3 月 25 日

学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学位規則第 4 条第 1 項

研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 技術社会システム専攻

学 位 論 文 題 目 高感度広ダイナミックレンジ撮像素子に関する研究

指 導 教 員 東北大学教授 須川 成利

論 文 審 査 委 員 主査 東北大学教授 須川 成利 東北大学教授 伊藤 隆司
東北大学客員教授 大見 忠弘
(未来科学技術共同研究センター)

論 文 内 容 要 旨

撮像素子技術は、最近のデジタルカメラや携帯電話等の普及拡大とともに、飛躍的にその性能向上が図られてきている。一方、高画質撮像、監視、医療、車載、科学計測などの分野では、肉眼や銀鉛フィルム以上の高い感度と広いダイナミックレンジを持ったイメージセンサの実現が強く望まれている。本論文は、こうした要望に応える新規な高感度広ダイナミックレンジ撮像素子技術を実現するために、新たな画素構造をもつ撮像素子を提案し、その最適設計論を論じ、設計・試作してその性能を明らかにした結果についてまとめたものであり、全文 5 章からなる。

第 1 章は、序論である。イメージセンサへの要求事項と、現状の CCD, CMOS イメージセンサや先行研究の広ダイナミックレンジ撮像素子の課題を述べ、1 回露光で高感度と高飽和信号量確保を同時に実現する新しい高感度広ダイナミックレンジ撮像素子創出の必要性について論じた。

第 2 章では、従来の撮像素子で課題となっていた、感度と飽和信号量のトレードオフを解消する、新たな画素構造を持つ撮像素子について論じた。図 1(a)は現状の 4 トランジスタ型 CMOS 撮像素子の画素等価回路図、(b), (c)は本撮像素子の画素等価回路図であり、それぞれフローティングディフュージョン部にリセットスイッチが接続された FD リセット型撮像素子と横型オーバーフロー蓄積容量素子 C_s にリセットスイッチが接続された CS リセット型撮像素子である。本撮像素子は、現状 4 トランジスタ型 CMOS 撮像素子と同様に、完全空乏転送型の埋め込みフォトダイオード(PD)、電荷電圧変換を行うフローティングディフュージョン(FD)、FD の寄生容量(C_{FD})、PD から FD へ電荷を転送する転送スイッチ(T)、FD を所定電位にリセットするリセットスイッチ(R)、画素ソースフォロアアンプ(SF)、画素選択スイッチ(X)と、PD に隣接して T, FD を介して新しく配置されたスイッチ(S)と横型オーバーフロー蓄積容量素子(C_s)を持つ。現状の撮像素子では、PD や FD が溢れるような強い光照射時に、溢れた光電荷が隣接画素に悪影響を及ぼさないように、基板や拡散層を介して電源端子に光電荷を捨てており、PD や FD の飽和信号量がダイナミックレンジを制限していた。また、電荷電圧変換が行われる FD では、容量値を小さくすることにより得られる高感度化と容量値を大きくすることにより得られる高飽和信号量確保を同時に実現できないことが課題となっていた。本撮像素子は、画素内に PD に隣接して、PD から溢れた光電荷を蓄積する横型オーバーフロー蓄積容量素子 C_s を新たに導入しながら、FD で電荷電圧変換を行う機構を残すことで、1 回露光で高い飽和信号量と高い感度を同時に得

て、広ダイナミックレンジ性能と高感度性能を同時に実現する。図 2(a), (b)は本撮像素子の動作タイミング図である。小さいフローティングディフュージョン容量で電荷電圧変換を行うことにより得られる高感度信号 S1 は、ノイズ N1 と光信号成分を含む $S1+N1$ の差分演算を行うことにより得られる。大きい横型オーバーフロー蓄積容量素子で電荷蓄積を行うことにより得られる高飽和信号 S2 は、蓄積開始前に読み出されるノイズ N2 と光信号成分を含む $S2+N2$ の差分演算を行うことにより得られる。次フィールドのノイズ $N2'$ を用いたノイズ除去を行う場合には、 $N2$ ノイズ補正時では除去できたりリセットノイズが除去できずに S2 信号に残留するが、 $S2+N2$ と $N2'$ は同じ水平ブランキング期間内に読みだされるためフレームメモリが必要ない。このように高感度信号 S1、高飽和信号 S2 のどちらにおいてもノイズ除去を行うことにより高 S/N 性能を実現する。本撮像素子は、埋め込み型フォトダイオード、小さいフローティングディフュージョン容量、ノイズ除去回路を用いることで、低照度条件での高感度高 S/N 性能を実現している。また、画素毎一つのフォトダイオードで受光し、露光時間分割を行わないため、時間・空間サンプリングずれも起さない、高感度広ダイナミックレンジ撮像素子を実現できる。

第 3 章では、第 2 章で述べた撮像素子について、感度とダイナミックレンジを最適化するための設計論について論じた。本撮像素子において、飽和前側の高感度信号 S1 と過飽和側の高飽和信号 S2 の信号切替え点における S/N 比の確保が、画質および高感度と高飽和信号量の最大値を決めることを明らかにし、その S/N 比を理論的に導き、さらに、S1/S2 信号切替え点における S2 信号の S/N 比の許容下限値を、ノイズを発生させたシミュレーション画像と多人数の被験者を用いた実験により決定した。図 3(a), (b)は、それぞれ $N2$ ノイズ補正時、 $N2'$ ノイズ補正時において、横軸に飽和信号量、縦軸に感度を取り、S1/S2 信号切替え点の S2 信号の S/N 比 SNR_{SW}^{S2} をパラメータにして、高感度と高飽和信号量確保の実現値を示したものである。灰色の実線は、 $(C_{FD} + C_s) / C_{FD} = 1$ のとき、すなわち横型

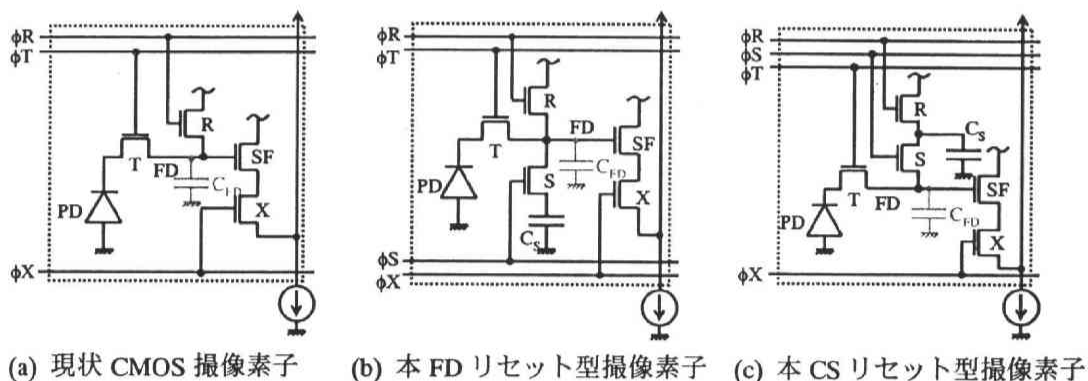


図 1 現状の 4 トランジスタ型 CMOS 撮像素子と本撮像素子の画素等価回路図

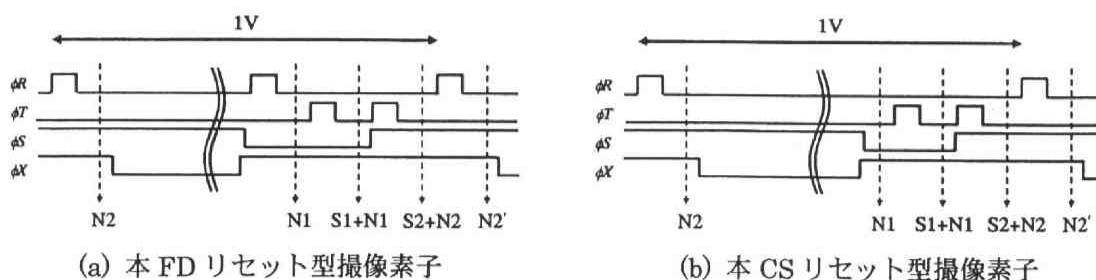


図 2 本撮像素子の動作タイミング図

オーバーフロー蓄積容量素子 C_S を用いない従来撮像素子の感度と飽和信号量のトレードオフを示しており、黒の実線は本撮像素子の感度と飽和信号量の実現値を示している。黒の実線で示した本撮像素子は灰色の実線で示した従来撮像素子に比較して、感度と飽和信号量を高く得ており、横型オーバーフロー蓄積容量素子 C_S を導入したことにより感度と飽和信号量のトレードオフを一桁以上解消して、高感度と高飽和信号量を同時に実現できるようになることが分かる。また、S1/S2 信号切替え点における S2 信号の S/N 比 SNR_{SW}^{S2} をできるだけ低く許容できることが、感度と飽和信号量のトレードオフを一層改善することも分かる。S1/S2 信号切替え点の S/N 許容下限値を求めるため、光ショットノイズ、暗電流、システムノイズ、リセットノイズをポアソン分布、ガウス分布に従ってシミュレーション画像に発生させ、S1/S2 信号切替え点を画像に表示してノイズ視認実験を行った。図 4 は、国際標準規格 ISO12232 に定義される人間の目でノイズが一番検知されやすい色 Gray 18 % の評価画像にノイズを発生させ、信号切替え点の信号量と暗時ノイズを変化させて S1/S2 信号切替え点の S/N 比を変えた画像である。多人数の被験者を用いてノイズの視認実験を行った結果、信号量に関わらず、S1/S2 信号切替え点の S2 信号の S/N 比を 32 dB 以上確保した条件において、ノイズが視認されないことが分かった。この値は、国際標準規格 ISO12232 で定義される excellent quality level に相当する S/N 値と同じ値である。これにより、全照度範囲で高い S/N 比性能を確保しながら高感度と高飽和信号量確保を同時に実現する撮像素子の最適設計論を構築した。

第 4 章では、撮像素子を実際に設計・試作した内容を明らかにし、撮像素子の感度、飽和、S/N 比、

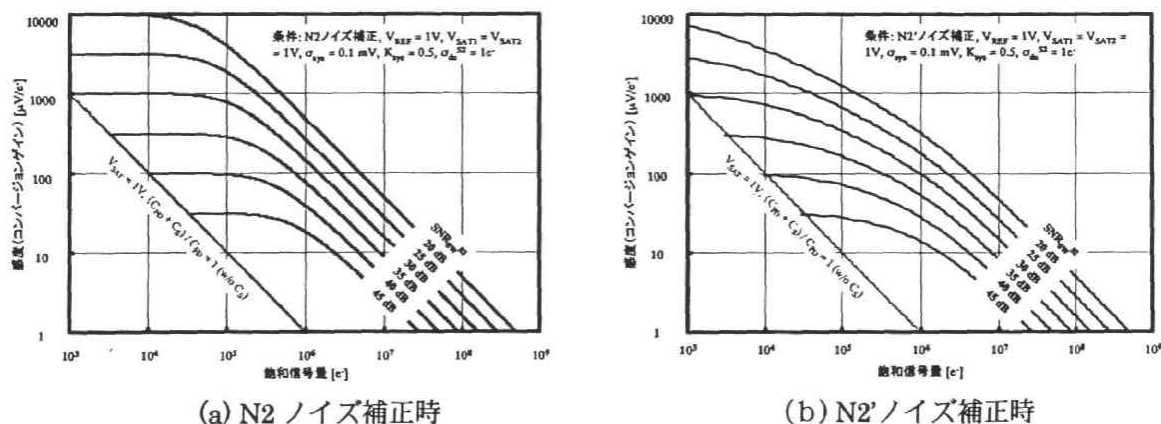


図 3 感度と飽和信号量のトレードオフ改善

信号量	SNR _{SW} ^{S2}	40 dB	38 dB	36 dB	34 dB	32 dB	30 dB	28 dB	26 dB	24 dB
10,000 e ⁻										
5,000 e ⁻		—	—							
2,500 e ⁻		—	—	—	—					
1,250 e ⁻		—	—	—	—	—				

図 4 シミュレーション画像によるノイズ視認実験画像

光電変換特性などの諸性能を実測した。これらの結果を、第3章で論じた画像シミュレーション結果と比較し、それらがよく一致することを示した上で、決定した S1/S2 信号切替え点における S2 信号の S/N 許容下限値を再確認した。図5は、試作デバイスによる撮像画像とシミュレーション画像の両方において、S1 画像と S2 画像を比較してノイズ許容下限値の視認実験を行った画像例である。一枚の画像は、左側に S1 画像、右側に S2 画像を配置し、そのつなぎ目である中央に線が視認されるかどうかにより、ノイズが視認される許容下限値を確認した。シミュレーション画像と試作デバイスによる撮像画像で S/N 値とノイズばらつきの対応が一致しており、画像シミュレーションが信頼できるものであることが照明できていることが分かる。また、S1 の S/N 比 28 dB, S2 の S/N 比 15 dB の場合は、試作デバイスによる撮像画像とシミュレーション画像の両方において、中央に線が視認されることが分かるが、S/N 比が高くなっていくとノイズばらつきが小さくなり、S2 信号の S/N 比が excellent quality level である 32 dB 程度以上を確保した画像ではノイズが視認されることがわかる。これにより、第3章のシミュレーション画像で確認された値と同様に、試作デバイスにおいても S1/S2 信号切替え点における S2 信号の S/N 許容下限値を 32 dB 以上確保すればノイズが視認されることが確認された。また、様々な照明条件下の画像を撮像し、従来の撮像素子で課題となっていた、感度と飽和信号量のトレードオフが解消できていること、ダイナミックレンジが約 100 dB の撮像素子の実現できたことを示した。図6は撮像例である。ダイナミックレンジ約 100 dB を実現したことにより、白とび黒つぶれなく良好な撮影が行えていることがわかる。

第5章は結論である。本研究による高感度広ダイナミックレンジ撮像技術は、高感度高 S/N かつ広ダイナミックレンジ性能が要求される多様な用途への応用が期待される。

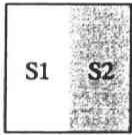










S1信号のS/N / S2信号のS/N		40dB / 37dB	37dB / 32dB	34dB / 27dB	31dB / 21dB	28dB / 15dB
 S1信号のS/N / S2信号のS/N ↑ 中央に線が見えるか否か	試作デバイスによる撮像例					
	シミュレーション画像					

図5 試作デバイスによる撮像画像とシミュレーション画像の比較によるノイズ許容視認実験



(a)グレースケールチャート (b)ITE 標準チャート (c)窓の外の景色と室内 (d)太平洋からの日の出と市街

図6 撮像例

論文審査結果の要旨

撮像素子技術は、最近のデジタルカメラや携帯電話等の普及拡大とともに、飛躍的にその性能向上が図られてきている。一方、高画質撮像、監視、医療、車載、科学計測などの分野では、肉眼や銀鉛フィルム以上の高い感度と広いダイナミックレンジを持ったイメージセンサの実現が強く望まれている。本論文は、こうした要望に応えうる新規な高感度広ダイナミックレンジ撮像素子技術を実現するために、新たな画素構造をもつ撮像素子を提案し、その最適設計論を論じ、設計・試作してその性能を明らかにした結果についてまとめたものであり、全文6章からなる。

第1章は、序論である。

第2章では、従来の撮像素子で課題となっていた、感度と飽和信号量のトレードオフを解消する、新たな画素構造を持つ撮像素子について論じている。画素内に、フォトダイオードに隣接して、フォトダイオードから溢れた光電荷を蓄積する横型オーバーフロー蓄積容量素子を導入し、1回露光で高い飽和信号量を得て、広ダイナミックレンジ性能を達成する。埋め込みフォトダイオード、小さいフローティングディフュージョン容量、オンチップノイズリダクション回路を用いることで、低照度条件でも高感度・高S/Nな性能を実現し、また、画素毎一つのフォトダイオードで受光し、露光時間分割を行わないため、時間・空間サンプリングずれも起さない、高感度広ダイナミックレンジ撮像素子を実現できることを明らかにしている。これは、極めて重要な成果である。

第3章では、第2章で述べた撮像素子について、感度とダイナミックレンジを最適化するための設計論について論じている。本撮像素子において、飽和前側の高感度信号 S_1 と過飽和側の高飽和信号 S_2 の信号切替え点におけるS/N比の確保が、画質および高感度と高飽和信号量の最大値を決めることを明らかにし、そのS/N比を理論的に導き、さらに、 S_1/S_2 信号切替え点における S_2 信号のS/N比の許容下限値を、ノイズを発生させたシミュレーション画像と多人数の被験者を用いた実験により決定している。これにより、全照度範囲で高いS/N比性能を確保しながら高感度と高飽和信号量確保を同時に実現する撮像素子の最適設計論を構築している。これは、極めて有用な成果である。

第4章では、撮像素子を実際に設計・試作した内容を明らかにし、撮像素子の感度、飽和、S/N比、光電変換特性などの諸性能を実測している。これらの結果を、第3章で論じた画像シミュレーション結果と比較し、それらがよく一致することを示した上で、決定した S_1/S_2 信号切替え点における S_2 信号のS/N許容下限値を再確認している。また、様々な照明条件下の画像を撮像し、従来の撮像素子で課題となっていた、感度と飽和信号量のトレードオフが解消できていること、ダイナミックレンジが約100dBの撮像素子を実現できたことを示している。これは、極めて有用な成果である。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、高感度広ダイナミックレンジ撮像素子技術を実現するために、新たな画素構造をもつ撮像素子を提案し、その最適設計論を論じ、設計・試作してその性能を明らかにした成果についてまとめたものであり、半導体電子工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。